

УДК 004.78: 65.012

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.182039

Розроблення елементів інформаційної технології підтримки прийняття рішень для перепрофілювання виробництва віртуальних приладобудівних підприємств

А. П. Собчак, Л. М. Лутай

Розглядаються проблеми перепрофілювання віртуальних виробничих підприємств, зокрема перспективи розвитку віртуального приладобудівного підприємства (ВПП). Такі підприємства функціонують за рахунок зовнішніх територіально розподілених ресурсів та мають змогу бути гнучкими у виробництві продукції відповідно до кон'юнктури ринку. Запропоновано елементи інформаційної технології (ІТ) для підтримки прийняття рішень щодо організації роботи ВПП. Елементи ІТ включають в себе моделі та структури для прийняття рішень, в тому числі для раціонального використання ресурсів при функціонуванні ВПП. Призначенням запропонованої ІТ є вирішення задачі підтримки прийняття рішень щодо перепрофілювання виробництва на віртуальних приладобудівних підприємствах, відповідно до кон'юнктури ринку. Необхідність у перепрофілюванні виробництва викликана складними умовами ринкової економіки для невеликих приладобудівних підприємств та підприємств середньої ланки. Виробнича програма формується виходячи з існуючого на даний момент попиту на різні категорії виробів, що входять у номенклатуру товарів підприємства або відповідають напрямку функціонування ВПП. Елементами ІТ є моделі для інформаційно-аналітичного порталу (ІАП), а також структурна схема розгортання та підтримки єдиного простору знань при гнучкому перепрофілюванні виробництва відповідно до кон'юнктури ринку. До складу ІАП входять також експертні системи (ЕС). Розроблена ІТ для підтримки прийняття рішень керівника ВПП дозволить виготовляти той продукт, який буде мати попит на ринку та буде рентабельним у виготовленні. ІТ забезпечить визначення кількості та видів необхідних ресурсів за заданими критеріями, їх розподіленості, враховуючи напрямок перепрофілювання виробництва.

Ключові слова: ресурси, віртуальне приладобудівне підприємство, моделі прийняття рішень, кон'юнктура ринку, перепрофілювання, математичні моделі.

1. Вступ

Віртуальне приладобудівне підприємство – підприємство, що складається із спільноти територіально розподілених субпідрядників, які взаємодіють у процесі виробництва, і функціонують через телекомунікаційні засоби [1].

З маркетингової точки зору, мета створення ВПП – отримання прибутку завдяки максимальному задоволенню споживачів в товарах та послугах, шляхом об'єднання ресурсів різних партнерів в єдину систему. Разом з тим, ефективність розподілу ресурсів між виробничими ланками може бути значно підвищена за рахунок надання їм традиційних функцій маркетингу [1, 2]. Таким

чином, діяльність ВПП орієнтована не на задоволення потреб «усередненого» покупця або сегменту ринку, а на задоволення індивідуальних запитів конкретних споживачів.

Характерними ознаками ВПП:

- гнучка зміна номенклатури продукції;
- робота без складу;
- відсутність основних фондів;
- мінімальна кількість співробітників;
- пріоритет горизонтальних зв'язків;
- відносна автономність і вузька спеціалізація учасників підприємства;
- високий статус інформаційних і кадрових засобів інтеграції;
- виконання принципу системного використання ресурсів;
- наявність гнучкої й адаптивної організаційної структури;
- мінімальний стартовий капітал;
- робота в умовах невизначеності попиту.

Традиційному підприємству для розроблення і випуску нового товару на ринок потрібно залучення значних ресурсів. На відміну від традиційного підприємства, в процесі функціонування здійснюється пошук нових партнерів, що володіють відповідними, ринковим потребам, ресурсами, знаннями та здібностями, для спільної організації і реалізації діяльності. При цьому за партнерів обираються підприємства (організації, окремі колективи, люди), що володіють ключовими ресурсами для досягнення конкурентної переваги на ринку. Таким чином, ВПП має конкурентні переваги, оскільки традиційним приладобудівним підприємством, особливо середньої ланки, в таких умовах досить складно залишатися на ринку з огляду великого податкового «пресу». Тому такий стан впливає на пошук нових способів організації виробництва. І одним із нових підходів являється організація віртуального виробництва. З іншого боку, відсутні глибокі теоретичні розробки по цьому напрямку та і не достатня кількість реально існуючих виробництв, щоб запозичити їхній досвід. Таким чином, необхідність створення нових технологій організації віртуального виробництва є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [3] наведені результати дослідження існуючих проблем малих виробничих підприємств та підприємств середньої ланки. Показано, що виробничим підприємствам середньої ланки досить складно конкурувати з промисловими гігантами. Причиною цього може бути те, що великі промислові підприємства мають налагоджений оборот ресурсів та готової продукції. Також впливає на популярність наявність торгової марки. Крім того, великі підприємства можуть здешевлювати свою продукцію за рахунок великих об'ємів виробництва. Варіантом подолання відповідних труднощів для малих підприємств та підприємств середньої ланки є створення чіткої стратегії організації виробництва. Саме такий підхід розглядається в роботі [3]. Представлено інструментарій для прийняття рішень при організації працівників виробничого процесу згідно з їх компетенцією. Також в статті запропоновано методологію, що заснована на методі індексу переваги, для прийняття рішення на етапі проектування життєвого

циклу виробничої системи. Методологія допомагає у виборі підходящої альтернативи з великого числа доступних варіантів по вирішенню виробничих проблем на основі систем підтримки прийняття рішень. Однак метод індексу переваги, що лежить в основі методології, не враховує будь-яку відносну важливість між атрибутами. Метод індексу переваги базується на статистичних обчисленнях, що вимагає розроблення комп'ютерної програми, яка приведе до скорочення часу обчислень.

Також існують інші способи організації людських ресурсів для інноваційних промислових проектів, що представлені в роботі [4].

Приладобудівні підприємства мають певні труднощі з визначення та ефективним розподілом як людських ресурсів, так і виробничих ресурсів, необхідних для підприємства. В якості ресурсів можуть виступати обладнання для виробництва і сировина. На даний момент розвиток комунікаційних технологій припускає віртуальну та тимчасову співпрацю в ланцюгах поставок ресурсів для отримання взаємних вигод. Перевагами такої співпраці є оперативність при обміні ресурсами та інформацією. Модель такої співпраці представлена в роботі [5]. Варіантом вирішення проблем постачання та розподілу виробничих ресурсів являється визначення стратегії створення віртуальних підприємств. Діяльність віртуальних приладобудівних підприємств спрямована на підвищення своєї конкурентоспроможності та оптимізацію процесів по використанню ресурсів.

В статті [6] приводиться аналіз виробничих підприємств в цілому, а також розглядаються логістичні процеси на підприємстві, та ланцюги поставок ресурсів. Результати аналізу показали необхідність пошуку наукових рішень по формуванню виробничої стратегії в рамках Industry 4.0 з управлінням мережею постачання ресурсів. Стратегія виробництва має включати гнучкість організації промислового підприємства.

В роботі [7] представлені результати досліджень адаптивних розподілених виробничих систем. Показано що, організація та впровадження віртуальних підприємств підвищує рівень гнучкості та адаптивності виробництва до динамічних умов ринку. Віртуальне підприємство забезпечує нові можливості, де виробнича система не відома заздалегідь. Виробнича система має буди структурована та оптимізована для виготовлення видів продукції, на який є попит в даний момент. Але не вирішеним питанням залишається автоматизація інформаційних потоків на віртуальних підприємствах.

Дослідження у сфері створення інформаційних технологій для управління віртуальними підприємствами представлені в роботах [8, 9]. В статтях наведені результати дослідження, що стосувалися, переважно, розподілення людських ресурсів організації. Але залишаються не вирішеними питання прийняття рішень по визначенню доцільності виготовлення того чи іншого виду продукції та граничнодопустимих обсягів виробництва.

Методи та моделі прийняття рішень вже раніше використовувались у виробництві.

Зростаюча динаміка невизначеності в зовнішньому середовищі вимагає пошуку нового управління та методів прийняття рішень, які забезпечують існуван-

ня підприємства (організації). Непередбачені зміни являються обов'язковою умовою сучасного бізнесу, яку варто брати до уваги в процесі управління.

Підвищення стійкості організацій може бути досягнуто шляхом перетворення динамічних змін у заплановані на основі застосування ефективних методів прогнозування та підтримки прийняття рішень з вивченням теорії життєвого циклу. Запропонована у статті [10] методологія стратегічного планування в контексті невизначеності зовнішнього середовища може застосовуватися на виробничих підприємствах.

Дослідження в роботі [11] спрямоване на розроблення основи підтримки прийняття рішень щодо стійкості життєвого циклу для ранжирування шляхів виробництва носія чистої енергії (водню) шляхом поєднання методу оцінки стійкості життєвого циклу і методу інтервальних багатокритеріальних рішень. Завдяки методу підтримки прийняття рішень був проведений аналіз чутливості для вивчення впливу ваг показників для оцінки стійкості. Запропонований багатокритеріальний метод прийняття рішень може враховувати невизначеності.

Предметом дослідження є процеси планування інвестиційних проектів розвитку організацій. Метою статті [12] є розроблення алгоритму та програмного продукту системи підтримки прийняття рішень для вибору методу залучення коштів до інвестиційного проекту. У статті вивчалась модель комплексного планування та реалізовувався інвестиційний проект. Серед вирішуваних задач статті було розроблення методу вибору оптимального варіанта реалізації інвестиційного проекту та розроблення елементів системи підтримки рішень по вибору способу інвестування. Результати дослідження показали, що ефективність інвестиційного процесу пов'язана з оцінкою та вибором найбільш привабливих інвестиційних проектів із ряду альтернатив, які забезпечать максимальний прибуток у майбутньому. Також було визначено стратегічні завдання інвестування у розвиток організацій та підприємств і розглянуто основні фінанси, які можуть бути залучені до виконання інвестиційного проекту. Застосування запропонованого методу та системи підтримки прийняття рішень на етапі планування інвестиційного проекту дозволить приймати обґрунтовані рішення щодо вибору методу інвестування залежно від основних факторів проекту та об'єкта інвестування.

Віртуальні підприємства стикаються зі складними проблемами організації виробництва продукції. Зокрема складно вирішуються проблеми перепрофілювання виробництва, враховуючи конкурентні умови ринкової економіки та потреби споживачів. Виходячи із проаналізованих літературних джерел, можна зробити висновок, що відсутні теоретичні розробки та практичні застосування віртуальних виробництв. Тому є необхідність у створенні інформаційних технологій для організації роботи віртуальних приладобудівних підприємств із гнучкою структурою та можливістю адаптації до ринкових умов, з визначенням та розподіленням необхідних ресурсів виробництва.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є створення елементів інформаційної технології для підтримки прийняття рішень по перепрофілюванню виробництва ВПП з ураху-

ванням кон'юктури ринку. Інформаційна технологія має враховувати раціональне використання ресурсів при функціонуванні ВПП, що дасть можливість автоматизувати процедури прийняття рішень по перепрофілюванню ВПП та раціональному розподілу його ресурсів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- дослідити, яким чином формуються рішення щодо перепрофілювання виробництва та планування програми випуску для кожного виду продукції з номенклатури виробів ВПП;
- обґрунтувати розподіл ресурсів для виготовлення продукції ВПП, з метою отримання конкурентної переваги на ринку.

4. Моделі і структури елементів інформаційної технології

4. 1. Формування рішень перепрофілювання виробництва та планування програми випуску віртуального приладобудівного підприємства

В сучасних умовах процес просування товарів та послуг на ринок, на якому вже присутня велика кількість конкурентів, є для багатьох компаній витратним, тривалим і складним. З метою просування продукції на сучасні ринки служби маркетингу використовують у своїй діяльності різні методи маркетингових комунікацій.

Маркетингові комунікації – це постійне управління просуванням своєї діяльності до споживача і клієнтів з метою:

1. Інформувати перспективних споживачів про свій продукт, послуги, умови продажів.
2. Переконати перспективних споживачів віддати перевагу запропонованим товарам і послугам.
3. Мотивувати перспективних споживачів до того, щоб вони діяли, не відкладаючи замовлення на майбутнє.

До сучасних засобів просування товару можна віднести інтернет-середовище. Основна мета якого – отримання максимального ефекту від потенційної аудиторії інтернет-ресурсів. Разом з тим, тенденції розвитку сучасних інформаційних технологій (ІТ) приводять до постійного зростання їхньої складності.

Одним із складових розробленої ІТ являється інформаційно-аналітичний портал (ІАП) ВПП, на якому накопичується та обробляється інформація про кон'юктуру ринку. Модель процесів ІАП побудовано за допомогою графічної мови IDEF0 і зображено на рис. 1.

Модель дає можливість клієнту сформулювати свої замовлення, які потім передаються у виробництво. Коли досягаються необхідні умови доцільності (рентабельності) виробництва і-того виду продукції, замовлення додається до портфелю номенклатури виробництва.



Рис. 1. Модель процесів інформаційно-аналітичного порталу

Інформаційна модель ІАП – це данні, що представляють суттєві параметри і змінні величини, зв'язки між ними, входи і виходи. Такий опис дозволяє моделювати можливі стани моделі, шляхом подачі на модель інформації про зміни вхідних величин [13, 14].

До вхідних даних ІАП відносяться:

- інформація про кон'юнктуру ринку;
- статистика відвідування сайтів інформаційних супутників і головного сайту ВПП;
- кількість укладених договорів про постачання продукції;
- обсяги і терміни поставок за кожним видом виробів, що випускаються;
- місця і способи доставки продукції, з прив'язкою до конкретного виду виробів (рис. 2).

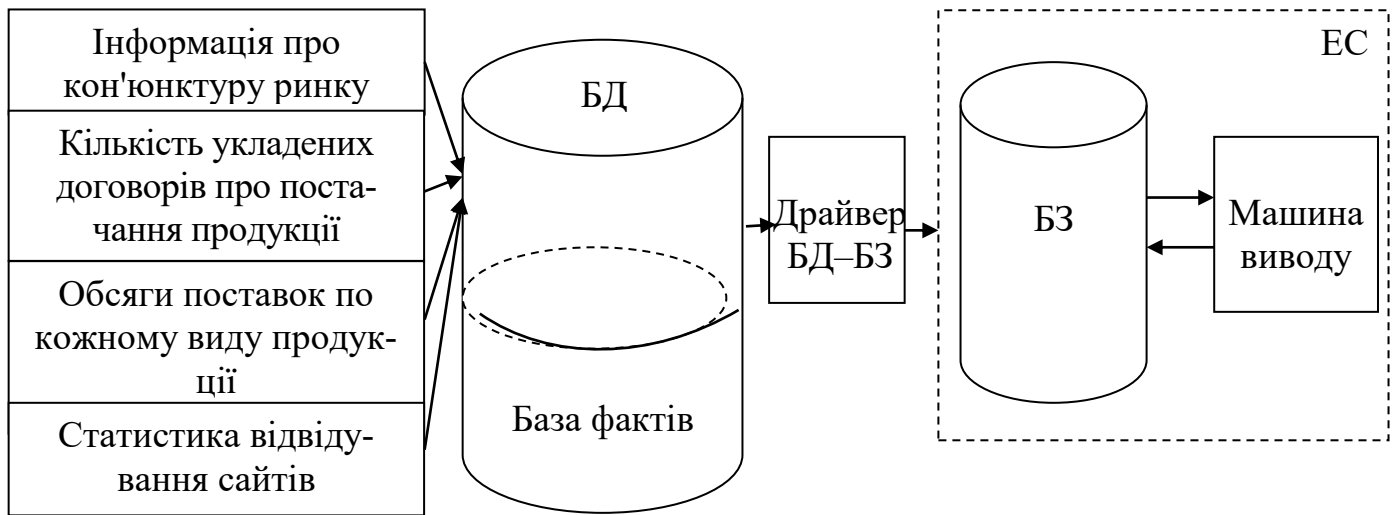


Рис. 2. Інформаційна модель ІАП

Базуючись на інформаційній моделі, сформовано структурну схему побудови, розгортання та підтримки єдиного простору знань при гнучкому перепрофілюванні виробництва, відповідно до кон'юнктури ринку (рис. 3).

На рис. 3 наведені такі позначення:

$\bar{X}_1 = \{x_1^1, \dots, x_n^1\}$ – множина потенційних клієнтів (Web-споживачів);

$\{x_{1(i)}^1 + 1 \dots x_{n(i)}^1 + n\}$ – множина потенційних замовлень; n – натуральне число, i - вид продукції;

N_{imin} – мінімально-допустима кількість замовлень i -го виду продукції для передачі заявки на виготовлення у виробництво;

ЕС – експертна система;

БПЗ – блок передачі заявок на виробництво.

Суть розроблюваної ІТ полягає у визначенні мінімальної партії кожного виду продукції, що забезпечує рентабельність виробництва і є виправданою для ВПП.

Інформаційні супутники також називатиємо рефлексивними агентами. Рефлексивні агенти представляють собою одно сторінкові сайти, які знаходять пошукові системи за якісними характеристиками продукції, що пропонуються на предмет виробництва. ІТ враховує кількість звернень до таких сайтів, що являється основою для визначення значущості та пріоритетності характеристик продукту при формування портфелю замовлень.

ІТ передбачає послідовне виконання трьох основних етапів – накопичувального, аналітичного та директивного.

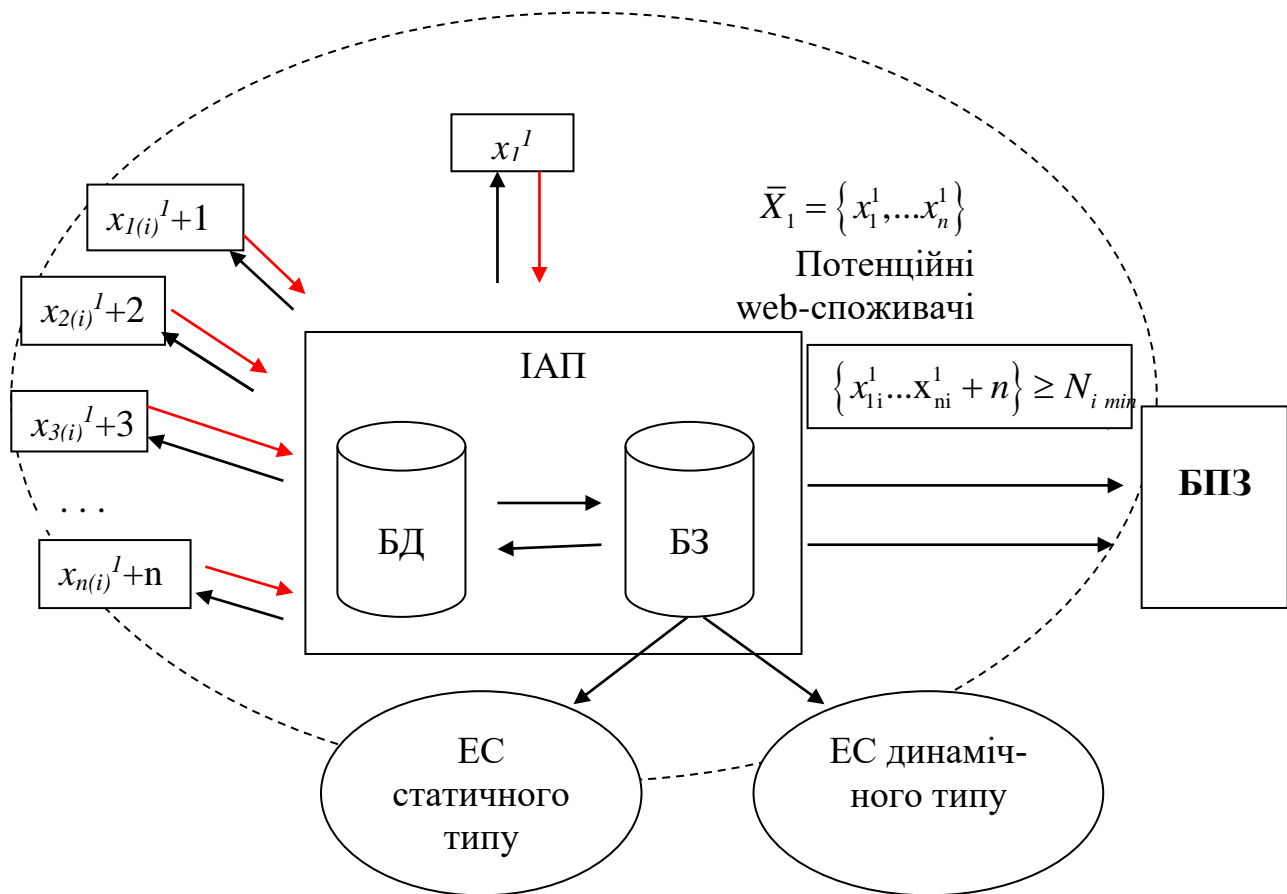


Рис. 3. Структурна схема розгортання та підтримки єдиного простору знань при гнучкому перепрофілюванні виробництва відповідно до кон'юнктури ринку

1-й етап (накопичувальний). Передбачає виконання кожним користувачем ІАП таких дій:

- Вибір режиму роботи користувача.
- Вибір категорії продукції ВПП.
- Вибір конкретного виду виробу (виробів).
- Попередня реєстрація користувача.
- Заповнення профілю користувача.
- Формування споживчого кошика, із зазначенням обсягу поставок за кожним видом продукції.
- Вибір місця, способу і терміну доставки продукції споживачеві.
- Введення платежів споживача.
- Перевірка на рентабельність виготовлення.
- Розміщення замовлення.

2-й етап (аналітичний). На даному етапі проводиться аналіз в середовищі ЕС за певний період (місяць, квартал) інформації про укладені договори на поставку кожного виду продукції, обсяги поставок, місце, спосіб та терміни доставки виробів замовнику.

3-й етап (директивний). На основі проведеного на попередньому етапі аналізу кон'юнктури ринку, в середовищі ЕС здійснюється формування рішень щодо перепрофілювання виробництва і визначається програма випуску продук-

ції за кожним видом з номенклатури виробів ВПП. Отримана на даному етапі інформація, дає можливість керівникові ВПП обґрунтовано формувати заявки на виробництво продукції.

Умова $\left\{ x_{1(i)}^1 + 1 \dots x_{n(i)}^1 + n \right\} \geq N_{imin}$ – кількість замовлень, необхідна для досягнення рентабельності виробництва i -ї продукції, при цьому:

$$N_{imin} \rightarrow \min$$

$$\left\{ x_{1(i)}^1 + 1 \dots x_{n(i)}^1 + n \right\} \rightarrow \max. \quad (1)$$

Підсистема моделювання для обчислення необхідного граничнодопустимого обсягу виробництва i -го виду продукції:

$$N_{imin} = x_n^1 i * n, \quad (2)$$

де $x_n^1 i$ – кількість замовлень на i -ий вид продукції; n – кількість i -ї продукції.

Відповідне кінцево-різницеve рівняння для граничнодопустимого обсягу виробництва i -го виду продукції має вигляд:

$$N_{imin+n} = x_n^1 i * n \text{ (з початковим значенням } n=1 \text{)}. \quad (3)$$

Створена ІТ забезпечує гнучкість в організації виробництва на ВПП за рахунок обліку динаміки зміни кон'юнктури ринку.

Таким чином, є можливість досягти стабільності потоку замовлень та інформативності об'єкту ринку за рахунок застосування примітивних рефлексивних агентів.

4.2 Математична модель розподілу ресурсів для виготовлення продукції віртуального приладобудівного підприємства

Є ресурс в кількості R . В якості ресурсу може виступати сировина, обладнання, час та інше. Є N споживачів ресурсу, для кожного з яких задана функція $\Psi(r_j)$, – ефект, який досягається у j -х споживачів, коли кількість використовуваного ним ресурсу одна. Потрібно розділити готівковий ресурс між споживачами так, щоб максимізувати сумарний ефект, тобто потрібно знайти

$$\max \sum_{j=1}^N \Psi_j(r_j) \quad (4)$$

за умови $\sum_{j=1}^N r_j \leq R \left(r_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, N \right)$.

Численні змістовні трактування цього завдання добре відомі. Існують інші різновиди постановки задачі про розподіл ресурсу, з яких враховуємо тут лише дві. Потрібно знайти $\min \max \Psi_j(r_j)$ за умови

$$\sum_{j=1}^N r_j \leq R \left(r_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, N \right). \quad (5)$$

Зазначена постановка задачі виникає, наприклад, при розподілі обладнання на деякому періоді в багатоканальній системі регулювання з часовим поділом каналів або в імпульсній системі регулювання N об'єктів через один канал зв'язку.

Для випадку системи регулювання з часовим поділом каналів R – період перемикання каналів; r_j – час, протягом якого канал зв'язку працює на j -му контурі регулювання. Розподіл часу регулювання об'єктів на періоді має забезпечити мінімізацію виникаючої помилки в найгіршому каналі.

У наступному варіанті потрібно знайти

$$\max \prod_{j=1}^N \Psi_j(r_j), \quad (6)$$

за умови $\sum_{j=1}^N r_j \leq R \left(r_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, N \right).$

Одним із завдань ІТ є розподіл ресурсів по різних складових виробництва ВПП, що забезпечує максимальну ймовірність правильного вирішення поставленого перед підприємством завдання. Наприклад, якщо R – загальний час для виконання підприємством завдання, а r_j – час, виділений на виконання j -ї підзадачі.

Якщо графік функції $\Psi_j(r_j)$ опуклий, тобто якщо

$$d^2 \Psi_j(r_j) / dr^2 < 0 (j = 1, 2, \dots, N),$$

то рішення задачі (3) єдино і з умов на сідлову точку функції Лагранжа слідує, що шуканий розподіл ресурсу є рішенням системи рівнянь

$$d^2 \Psi_j(r_j) / dr^2 < 0 (j = 1, 2, \dots, N), \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^N r_j - R = 0.$$

Тут може мати місце два випадки:

- 1) рішення системи (7) існує і тоді в силу угнутості функцій єдине;
- 2) рішення системи (7) не існує. Останнє означає існування домінуючих і рецесивних об'єктів.

Об'єкт називається домінуючим (рецесивним), якщо похідна від функції користі цього об'єкту у всьому діапазоні зміни більше (менше) похідних від

функцій користі інших об'єктів. У разі існування домінуючих об'єктів весь ресурс розподіляється між ними. Рецесивні об'єкти не отримують ресурсу взагалі. Нижче будемо розглядати випадок існування рішення всередині області допустимих значень розподіляемого ресурсу. Буде видно, що запропоновані способи організації колективної поведінки забезпечують вихід на оптимальний розподіл навіть в разі, коли рішення є граничним.

Як і при аналізі розподілу, якщо функції $\Psi_j(r_j)$ спадаючі, то вирішення задачі (5) єдино і шуканий розподіл ресурсу визначається з рішення системи рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_j(r_j) - \lambda = 0 (j = 1, 2, \dots, N) \\ \sum_{j=1}^N r_j - R = 0 \end{array} \right\}. \quad (8)$$

Зауваження щодо домінуючих і рецесивних об'єктів залишається в силі і для цього випадку.

З порівняння (7) і (8) випливає, що

$$\max \sum_{j=0}^N \int_0^{r_j} \psi_j(x) dx; \quad (9)$$

Забезпечує

$$\min \max \psi_j(r_j), \quad (10)$$

отже, способи вирішення завдання (4) однозначно поширюються на рішення задачі (5). Тому далі будемо розглядати тільки рішення задачі (4).

Вирішення завдання про розподіл ресурсу має два аспекти: обчислювальний і управлінський. У разі, коли функції $\Psi_j(r_j)$ відомі, виникає обчислювальна задача нелінійного програмування, ряд способів вирішення якої добре відомий. З іншого боку, якщо функції $\Psi_j(r_j)$ апіорно невідомі, а відомі лише їх поточні значення, причому самі функції, як це часто буває на практиці, змінюються в часі, то виникає задача оперативного перерозподілу ресурсу в процесі функціонування системи, тобто завдання управління.

З огляду на той факт, що рівняння системи (7) є частковими похідними від функції Лагранжа, можна організувати децентралізовану поведінку в завданні розподілу ресурсу, яке засноване на градієнтному методі вирішення цього завдання:

Такий підхід еквівалентний тому, що кожен споживач ресурсу максимізує свою локальну функцію корисності виду:

$$r_j = \left\{ \begin{array}{l} x_j n p u \sum_{j=1}^N x_j \leq R \\ \frac{R_{x_j}}{\sum_{j=1}^N x_j} n p u \sum_{j=1}^N x_j > R \end{array} \right\}, \quad (11)$$

де x_j – запит j -го споживача ресурсу.

Тепер розглянемо локальні правила поведінки, що забезпечують максимізацію сумарного ефекту. Як впливає зі вказаного вище, необхідний розподіл ресурсу визначається рішенням системи (7), а рішення системи (7) відповідає максимуму локальних функцій користі (10), за умови, що попит дорівнює пропозиції. Тоді природно змінювати величину запиту на кожному кроці за такими правилами:

$$\begin{aligned} x_j(t+1) &= x_j(t) + k1 \frac{\Delta \psi_j(r_j(t))}{\Delta r_j(t)} - \lambda(t), \\ \lambda(t+1) &= \lambda(t) + k2 \left[\sum_{j=1}^N x_j - R \right], \end{aligned} \quad (12)$$

де ціна на ресурс формується в ІАП по різниці між попитом і пропозицією.

Безпосередньо з (12) випливає, що точка рівноваги системи відповідає оптимальному розподілу ресурсу. При цьому виникає питання про стійкість і досяжність точки рівноваги. Труднощі, пов'язані з аналізом стійкості такої системи, полягають в тому, що точка рівноваги лежить на гіперплощині $\sum_{j=1}^N x_j - R = 0$, по різні боки якої ресурс розподіляється за різними правилами (11), що призводить до розриву похідних на гіперплощині обмежень.

Ця складність може бути вирішена зміною правил розподілу ресурсу між споживачами. Якщо сума запитів не перевищує наявної кількості ресурсу, то, як і раніше, всі запити задовольняються повністю. Якщо сума запитів перевищує кількість ресурсу, то розподіляється не весь ресурс, і частка ресурсу, яка дорівнює ε , залишається нерозподіленою, тобто

$$r_j = \left\{ \begin{array}{l} x_j n p u \sum_{j=1}^N x_j \leq R \\ \frac{(R - \varepsilon) x_j}{\sum_{j=1}^N x_j} n p u \sum_{j=1}^N x_j > R \end{array} \right\}. \quad (13)$$

При цьому оптимальний розподіл будемо шукати не для обмеження

$$\sum_{j=1}^N r_j - R = 0,$$

а для обмеження $\sum_{j=1}^N r_j - R = -\varepsilon$.

У цьому випадку точка рівноваги лежить під гіперплощиною

$$\sum_{j=1}^N r_j - R = 0,$$

всередині області, де отримуємо споживачів. Кількість ресурсу збігається з його запитом, і поведінка системи рівнянь (12) збігається з поведінкою різницевої схеми, що реалізує градієнтний метод. Тоді на стійкість в малій системі (12) поширюються всі результати про стійкість в малому градієнтному методі в цьому завданні нелінійного програмування. Стійкість системи в цілому вимагає, крім стійкості чистого градієнтного методу, ще й наступної характеристики траєкторій системи в просторі параметрів x_j . Різна траєкторія після кінцевого числа переселень гіперплощини залишиться в області параметрів, в якій лежить точка рівноваги.

Розглянемо стійкість системи диференціальних рівнянь, еквівалентних системи різницевих рівнянь (12). При цьому позначимо через $\varphi_i(x_j)$ функцію $\frac{d\psi_j(x_j)}{dx_j}$. Параметр ε можна розглядати як точність розподілу, або як певний резерв, який повинен зберігатися при оптимальному розподілі (при цьому під час виходу на оптимальний розподіл може використовуватися весь ресурс, включаючи резерв ε). Будемо вважати також, що ціна λ може приймати значення з відрізка $[\lambda_1, \lambda_2]$, де $\lambda_1 \leq \lambda_1^*, \lambda_2 \leq \lambda_2^*$, а λ_1^* та λ_2^* можна отримати з апіорних оцінок для функції $\varphi_i(r_j)$. Отже, розглянемо систему

$$\begin{cases} x_i = k_1 \Phi_i(x_1, x_2, \dots, x_{n+1}) (i = 1, 2, \dots, n) \\ x_{n+1} = -k_2 \Phi_{n+1}(x_1, x_2, \dots, x_n), \end{cases}$$

$$f_{n+1}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } x_{n+1} = \lambda_1 i \sum_{j=1}^N x_j - 1 + \varepsilon \geq 0 \\ 0, \text{ якщо } x_{n+1} = \lambda_2 i \sum_{j=1}^N x_j - 1 + \varepsilon \leq 0 \\ \sum_{j=1}^N x_j - 1 + \varepsilon \text{ в інших випадках,} \end{cases}$$

де $\varepsilon, \lambda_1, \lambda_2, k_1, k_2$ – деякі постійні ($\varepsilon \in (0,1); k_1, k_2 > 0$),

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } x_i = 0 \text{ и } x_{n+1} - \mu_i \leq 0 \\ 0, \text{ якщо } x_i = 0 \text{ и } x_{n+1} - \mu_i \geq 0 \\ x_{n+1} - \mu_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ в інших випадках} \end{cases}$$

при цьому

$$\mu_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} \phi_i(x_1), \text{ якщо } \sum_{j=1}^N x_j \\ \phi_i(x_1 \left| \sum_{j=1}^N x_j \right|), \text{ якщо } \sum_{j=1}^N x_j > 1 \end{cases}. \quad (14)$$

Відносно чисел λ_1, λ_2 і функції ϕ_i , будемо припускати таке:

- 1) $\lambda_1 < \lambda_2, \phi_1(0) = \phi_2(0) = \dots = \phi_n(0)$, існує $h > 0$ таке, що для будь-якого $i = 1, 2, \dots, n; \lambda_1 - \phi_i(0) < -h, \lambda_2 - \phi_i(0) - a_i^{(2)}$;
- 2) існують $a_i^{(1)} > 0, a_i^{(2)} > 0 (1 \leq i \leq n)$ такі, що для будь-яких $\lambda_1 - \phi_i(0) < -h, \lambda_2 - \phi_i(0) - a_i^{(2)} > h$;
- 3) існують $a_i^{(1)} > 0, a_i^{(2)} > 0 (1 \leq i \leq n)$ такі, що для будь-яких $\xi \in (0,1), \eta \in (\xi, 1 - \xi)$

$$a_i^{(1)} \leq \frac{\phi_i(\xi + \eta) - \phi_i(\xi)}{\eta} \leq a_i^{(2)}.$$

Зауваження 1. Умова 3 виконується, зокрема якщо функція ϕ_i диференціюється на $(0,1)$

Зауваження 2. Якщо виконані умови 2 і 3, то для будь-якого $\eta \in [0,1]$

$$\lambda_1 - \phi_i(\eta) < -h, \lambda_2 - \phi_i(\eta) > h,$$

$$\lambda^* = \max \{ |\lambda_1|, |\lambda_2| \}, \quad \phi^* = \min_{1 \leq i \leq n} (-\phi_i(0) - a_i^{(1)}),$$

$$a = \min_{j=1, \dots, n} a_j^{(1)}, A_1 \sum_{i=1}^n a_i^{(2)}, \Phi_1 = \sum_{i=1}^n \phi_i(1), \lambda = \lambda_2 \lambda_1.$$

Далі будемо припускати, що система (14) має лише один стан рівноваги $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_{n+1}^*)$ і такий, що x^* – внутрішня точка області

$$G_1 = \left\{ x \mid x_1 \in [0,1], \dots, x_n \in [0,1]; x_{n+1} \in [\lambda_1, \lambda_2]; \sum_{j=1}^N x_j \leq 1 \right\}, \quad (15)$$

тобто

$$\sum_{j=1}^N x_j^* = 1 - \varepsilon < 1, x_{n+1}^* = \phi_i(x_i^*) \in (\lambda_1, \lambda_2), x_i^* \in (0,1).$$

З вигляду системи (9) випливає, що будь-яка траєкторія системи, що починається в області $X_1 = \left\{ x \mid x_1 \in [0,1], \dots, x_n \in [0,1]; x_{n+1} \in [\lambda_1, \lambda_2] \right\}$ при зростанні часу не покидає множини X , і точка x^* – єдиний стан рівноваги в області

$$G = G_1 \cap X.$$

Нехай ε^*, γ – деякі постійні такі, що

$$\varepsilon^* \in (0, \varepsilon), \gamma \in (0, \frac{a\varepsilon^*(\varepsilon - \varepsilon^*)^2}{(n\lambda^* + \Phi_1)}). \quad (16)$$

Тоді при виконанні пропозицій має місце наступна теорема.

Теорема 1. Якщо ε^*, γ обрані згідно (16) і для k_1 та k_2 виконано нерівність

$$\frac{k_2}{k_1} > \max \left\{ \frac{A_1 |\lambda_1 - \phi^*|}{\varepsilon - \varepsilon^*}, \frac{A_1 n \lambda^2}{\varepsilon h \left(\frac{a\varepsilon(\varepsilon - \varepsilon^*)^2}{n\lambda^* + \Phi_1} - \gamma \right)} \right\}, \quad (17)$$

то рішення системи $x = x^*$ (14) асимптотично стійке з областю тяжіння X . Доказ спирається на наступні леми (доказ яких опускаємо).

Лема 1. Нехай $\delta > 0$ довільне число та $k_2 > \frac{n\lambda^2}{\varepsilon h \delta}$. Тоді ніяка траєкторія $x(t)$ системи (9), така, що

$$x(t^*) \in H = \left\{ x \mid \sum_{j=1}^n x_j = 1 \right\} \cap X, \quad (18)$$

не може перебувати в області X / G при всіх $t \in [t^*, t^* + \delta]$.

Лема 2. Нехай $\varepsilon^* > 0$ – деяке число з проміжку $(0, \varepsilon)$,

$$\frac{k_2}{k_1} > \frac{A_{1|\lambda_1 - \phi^*|}}{\varepsilon - \varepsilon^*}, \quad (19)$$

функції ϕ_i мають похідні на $(0,1)$ і задовольняється співвідношення (15). Тоді будь-яка траєкторія $x(t)$ системи (14), що переходить в момент часу t^* , при

$$t \in \Delta^* = \left[t^*, t^* + \frac{\varepsilon^*}{k_1(n\lambda^* + \Phi_1)} \right], \quad (20)$$

буде знаходитися в шарі $G_{\varepsilon^*} = \left\{ x \left| \sum_{j=1}^n x_j \in [1 - \varepsilon^*, 1] \right. \right\} \cap G$ (і, отже, не покине області G).

Лема 3. Похідна за часом функції

$$v(x) = \sum_{j=1}^n (x_j - x_j^*) + \frac{k_1}{k_2} (x_{n+1} - x_{n+1}^*)^2. \quad (21)$$

В силу системи (14) на G невід’ємна, і при цьому множина

$$M = \left\{ x \left| \frac{dv(x)}{dt} = 0 \right. \right\}, \quad (22)$$

не містить цілих траєкторій системи (14).

Лема 4. При зроблених відносно κ_1 і κ_2 припущеннях будь-яка траєкторія $x(t)$ системи (14) не може перетинати гіперплощину

$$\sum_{j=1}^n x_j = 1 - \varepsilon \text{ більше } N_{x,t} = \left\lceil \frac{v(x(0))}{\gamma} + 1 \right\rceil + 1 \text{ разів}$$

при цьому $|a|$ позначає цілу частину числа a).

На закінчення відзначимо, що якщо функції ϕ_i такі, що $a_i^{(1)} < a_i^{(2)} < 0$, то при $k_1 < 0$, $k_2 < 0$ має місце твердження, аналогічне твердженням теореми.

Нехай в системі є десять споживачів з локальними функціями

$$\left\{ \begin{array}{ll} \psi_1(r_1) = 2,125 \ln(1 + r_1), & \psi_6(r_6) = 2 \sin r_6, \\ \psi_2(r_2) = 2,125 \ln(1 + r_2), & \psi_7(r_7) = r_7(2,125 - r_7), \\ \psi_3(r_3) = \sqrt{2r_4}, & \psi_8(r_8) = \frac{1}{2} r_8(4,25 - r_8), \\ \psi_4(r_4) = \sqrt{3r_4}, & \psi_9(r_9) = 2,25(1 - e^{-r_9}), \\ \psi_5(r_5) = \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} r_s, & \psi_{10}(r_{10}) = 2,25(1 - e^{-r_{10}}). \end{array} \right. \quad (23)$$

У розглянутому прикладі $R=1$.

Зауважимо, що споживачі ресурсу не знають виду своєї функції $\psi_j(r_j)$ і орієнтуються тільки на поточні її значення. Розподіл ресурсу швидко сходиться до оптимального.

Розглянута вище математична модель має недоліки, що обумовлені низкою причин.

По-перше, якщо це може бути вирішено градієнтним методом і існує можливість локального визначення часткових похідних від функції, що максимізується (мінімізується), то організація колективної поведінки не становить особливих труднощів. Вивчення таких моделей, крім подолання ряду специфічних для кожного завдання труднощів, не дає істотного матеріалу для просування у вивченні колективної поведінки.

По-друге, використання множників Лагранжа природньо, оскільки допускається зручна змістовна трактовка, наприклад, як ціна, але визначення значень множників Лагранжа, вимагає вирішення цього завдання в ІАП. При вивченні моделей колективної поведінки природне бажання максимально спростити функції ІАП, за рахунок перенесення усіх складнощів вирішення завдання на спільну поведінку членів колективу.

У складних системах часто розрізняють інформаційні, енергетичні і матеріальні потоки. При цьому треба пам'ятати, що енергетичні та матеріальні потоки несуть в собі інформацію про місцезнаходження принаймні кількістю переданої енергії або матеріалів. На цьому принципі здійснюється гуморальне регулювання в організмі. Для управління таким складним організмом, як мурашник в цілому, інформація, яка міститься в потоках спільного перетравлення їжі, мабуть, важливіше обміну сигналами між окремими мурашками. Ці міркування дають спонукальний мотив для того, щоб спробувати при організації колективної поведінки в завданні про розподіл ресурсу використовувати інформацію, що міститься в кількості ресурсу, що надходить від кожного споживача.

Для оцінки ефективності своєї поведінки кожного споживача необхідно знати об'єм доходу, тобто різницю між своїм «виробництвом» $\psi_j(r_j)$ і вартістю витраченого ресурсу $\lambda r_j = C_j$.

З градієнтного методу розв'язання задачі про розподіл ресурсу слідує, що споживачеві треба знати ціну на ресурс, тобто

$$\frac{C_j}{r_j} = \lambda. \quad (24)$$

Останнє наводить на думку використовувати в якості параметра взаємодії не запит на необхідну кількість, а деяку суму грошей C_j , на яку j -й споживач просить виділити йому ресурс. Ще раз зауважимо, що всі використовувані при описі організації поведінки економічні терміни суто умовні. Всі заявки на ресурс в грошовому вираженні надходять в центр, де ресурс розподіляється пропорційно отриманим грошам, тобто

$$x_j = \frac{RC_j}{\sum_{j=1}^N C_j}. \quad (25)$$

Тоді ціна одиниці ресурсу дорівнює

$$\lambda = \frac{\sum_{j=1}^N C_j}{R}, \quad (26)$$

і легко відновлюється у споживача за кількістю отриманого ресурсу $\lambda = \frac{C_j}{r_j}$. Звідси очевидна організація поведінки.

Неважко бачити, що рішення системи

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_j(r_j)}{dr_j} - \frac{C_j}{r_j} = 0 \\ r_j = \frac{RC_j}{\sum_{j=1}^N C_j} \end{array} \right., \quad (27)$$

збігається з рішенням системи (7), причому $C_j = \lambda r_j$. Отже, метод «наївного градієнта», заснований на (27), повинен мати точку рівноваги, збігається з оптимальним розподілом ресурсу.

Для організації колективної поведінки, що забезпечує оптимальний розподіл ресурсу, будемо вимагати, щоб кожен споживач на кожному кроці видавав в ІАП запит на бажану кількість ресурсу C_j . ІАП розподіляє ресурс пропорційно заявкам, що надійшли відповідно до (26). При цьому величина запиту на кожному кроці формується у споживачів наступним чином:

$$C_j(t+1) = C_j(t) + k \left[\frac{\Delta \Psi_j(r_j)}{\Delta r_j} - \frac{C_j}{r_j} \right]. \quad (28)$$

Розглянемо задачу розподілу ресурсу R між N споживачами, що забезпечує $\max \sum_{j=1}^N \psi_j(r_j)$ при обмеженні

$$\Phi(r_1, r_2, \dots, r_N) \leq 0. \quad (29)$$

У разі, якщо функції $\psi_j(r_j)$ – опуклі $\left(\frac{d^2 \psi_j(r_j)}{dr_j^2} < 0 \right)$ і $\Phi(r_1, r_2, \dots, r_N) \leq 0$ – зростаюча функція $r_j \left(\frac{\partial \Phi(r_1, r_2, \dots, r_N)}{\partial r_j} \right) > 0, j = 1, 2, \dots, N$, оптимальний розподіл єдиний і визначається рішенням системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_j(r_j)}{dr_j} = \lambda - \frac{\partial \Phi(r_1, r_2, \dots, r_N)}{\partial r_j} = 0, j = 1, 2, \dots, N, \\ \Phi(r_1, r_2, \dots, r_N) = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (30)$$

При виконанні ряду умов ця система може бути вирішена градієнтним методом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{r}_j &= \frac{d\psi_j(r_j)}{dr_j} - \frac{\partial \Phi(r_1, r_2, \dots, r_N)}{\partial r_j} \\ \dot{\lambda} &= \Phi(r_1, r_2, \dots, r_N) \end{aligned} \right\}. \quad (31)$$

Аналогічно попередньому випадку, кожен споживач ресурсу посилає в ІАП на кожному такті роботи системи деяку «суму грошей» C_j і отримує деяку кількість ресурсу r_j . Споживач повинен формувати свій запит так, щоб максимізувати локальну функцію користі

$$S_j = d\psi_j(r_j) - C_j. \quad (32)$$

S_j досягає максимуму в точці, що відповідає умові

$$\frac{\partial S_{j0}}{\partial r_j} = \frac{d\psi(r_i)}{dr_j} - \frac{\partial C_j}{\partial r_j} = 0. \quad (33)$$

При фіксованому λ можна вважати, що $C_j = \lambda_j r_j$, де λ_j – ціна ресурсу j -го споживача. Зауважимо, що $\frac{\partial s_j}{\partial c_j} = \frac{\partial s_j}{\partial r_j} \times \frac{\partial r_j}{\partial c_j}$ і умови екстремуму S_j по r_j і c_j збігаються. Локальна ціна $\lambda_j = \frac{c_j}{r_j}$ і може бути відновлена у споживача. Таким чином, для виходу системи на умовний екстремум необхідно, щоб в ІАП ресурс розподілявся так, щоб

$$\frac{C_j}{r_j} = \lambda \frac{\partial \Phi(r_1, r_2, \dots, r_N)}{\partial r_j}. \quad (34)$$

Звідси випливає, що частини ресурсу, які виділяються споживачам, визначаються в ІАП шляхом реалізації системи рівнянь

$$\begin{cases} r_j = \frac{C_j}{\lambda} \cdot \frac{1}{\frac{\partial \Phi(r_1, r_2, \dots, r_N)}{\partial r_j}}, \\ \Phi(r_1, r_2, \dots, r_N) = \Phi^*(\lambda) = 0 \end{cases}, \quad (35)$$

а правило локальної поведінки відповідно до (31) має вигляд

$$\Delta C_j(t) = k \left[\frac{\Delta \psi_j(r_j)}{\Delta r_j(t)} - \frac{C_j(t)}{r_j(t)} \right]. \quad (36)$$

Неважко виявити, що ситуації рівноваги (31) і (36) з урахуванням (35) збігаються.

Виникає питання про умови, при яких система різницевих рівнянь (36) є стійкою. Це питання, через значні аналітичні труднощі, не досліджене. Однак при розумному виборі коефіцієнта k рішення системи (36) сходиться з задовільною швидкістю. При цьому ще раз зауважимо, що результати говорять тільки про те, що система (36) стійка.

5. Обговорення результатів дослідження перепрофілювання віртуальних приладобудівних підприємств

Розроблено інформаційно-аналітичний портал, що забезпечує накопичення та оброблення інформації про кон'юктуру ринку. Крім того, розроблено модель процесів інформаційно-аналітичного порталу, що дозволяє клієнту сформувати свої замовлення, які потім передаються у виробництво. Коли досягаються необхідні умови доцільності (рентабельності) виробництва конкретного виду продукції, замовлення додається до портфелю номенклатури виробництва. Також запропоновано інформаційну модель ІАП. Базуючись на інформаційній моделі, сформовано структурну схему побудови, розгортання та підтримки єдиного простору знань для гнучкому перепрофілюванню виробництва, відповідно до кон'юктури ринку.

Розроблено математичну модель обґрунтування розподілу ресурсів для виготовлення продукції ВПП. Визначення рентабельності випуску продукції розраховується у відповідності з формулою, що включає множину потенційних замовлень. Кількість замовлень визначається за допомогою ІАП. Запропоновано кінцево-різницеve рівняння для гранично-допустимого обсягу виробництва конкретного виду продукції. Отримані результати обчислень дозволяють вирішити задачу перепрофілювання виробництва.

В процесі дослідження визначено, що роботи у сфері створення інформаційних технологій для управління віртуальними підприємствами дозволяють розподіляти людські ресурси організації. Але залишались не вирішеними питання прийняття рішень по визначенню доцільності виготовлення того чи іншого виду продукції та граничнодопустимих обсягів виробництва і розподілу ресурсів виробництва. Завдяки створенню елементів ІТ вдалося отримати можливість адаптації віртуального виробництва до ринкових умов, з визначенням та розподіленням необхідних ресурсів. Для забезпечення стандартної роботи ІАП необхідно виділити сучасний сервер з широкими можливостями оброблення значної кількості потоків інформації.

Недоліком запропонованих моделей можна вважати те, що аналіз та підтримка прийняття рішень формуються виключно із статистичних даних, які видає портал, сайт або інші Internet-ресурси. Але не взято до уваги те, що є покоління та категорії людей, які з деяких причин не можуть користуватись мережею Internet. Таким чином, дані, які передаються у систему для розрахунку гранично-допустимої кількості виготовлення продукту не є точними, а мають досить велику похибку. Тому це питання ще залишається відкритим та потребує більш глибокого дослідження, за результатами врахування більшої кількості інформаційних каналів для збору статичних даних щодо певних властивостей виробів, які впливають на рішення підприємства щодо подальшого напрямку функціонування.

Розвиток даного дослідження може полягати в розробленні додаткових елементів ІТ, в основі яких можуть лежати методи або моделі для формування структури виробу з новими якісними властивостями, які вимагає кон'юктура ринку. Подальший розвиток дослідження може бути спрямований на розроблення підходів по створенню додаткових інформаційних каналів для збору статич-

них даних щодо потреб у нових властивостях продукції виробництва. Серед вірогідних підходів може бути анкетування та опитування потенційних клієнтів.

Планування подальшого розвитку дослідження може бути спрямовано на вдосконалення ІТ для прийняття рішень по перепрофілюванню виробництва ВПП. Зокрема ІТ можна розвивати в напрямку прогнозування ймовірних строків кожного етапу виготовлення продукції.

6. Висновки

1. На основі запропонованої ІТ вирішується задача доцільності перепрофілювання виробництва та планування програми випуску для кожного виду продукції відповідно до кон'юнктури ринку. Прийняття рішення щодо перепрофілювання виробництва на ВПП здійснюється завдяки:

- створенню структурної схеми розгортання та підтримки єдиного простору знань ІАП при гнучкому перепрофілюванні виробництва відповідно до кон'юнктури ринку;
- визначенню рентабельності випуску продукції відповідно з кількістю запитів потенційних покупців на властивості продукту або функції, які хоче бачити споживач у новому товарі;
- розрахунку у вигляді формули визначення граничнодопустимої мінімальної кількості певного виду товару, що визначається його рентабельністю;
- визначенню доцільності виготовлення можливих видів продукції ВПП.

2. Обґрунтовано раціональний розподіл ресурсів для виготовлення продукції ВПП шляхом створення математичної моделі, що являється елементом ІТ. Метою такої моделі є отримання конкурентної переваги на ринку, запропонованої до виробництва продукції та загалом ВПП.

Запропоновані елементи ІТ забезпечують розрахунок певної кількості виробничих ресурсів, їх якісного складу для виготовлення продукції ВПП, що є вагомим для перепрофілювання, так як важливо не лише виготовляти те що потребує ринок, а виготовляти продукт вчасно. При цьому, продукт має бути якісним та сертифікованим. А саме ці моменти лягають на плечі виробничих ресурсів. Рішення керівника ВПП щодо розподілу ресурсів визначаються критеріями: якість, строки, ціна та інші. Вибір того чи іншого субпідрядника є чи не найголовнішим та найвідповідальнішим моментом у реалізації програми випуску продукції ВПП.

Література

1. Макиєнко, И. И. (2003). Поведение потребителей в Интернет-среде. Маркетинг и маркетинговые исследования, 4, 8–16.
2. Кравченко, В. И., Кравченко, В. В. (2009). Проектирование средств электронной коммерции для предприятия малого бизнеса. Економіка промисловості, 1, 95–101.
3. Decius, J., Schaper, N. (2017). The Competence Management Tool (CMT) – A New Instrument to Manage Competences in Small and Medium-sized Manufacturing Enterprises. Procedia Manufacturing, 9, 376–383. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.041>

4. Matyushenko, I., Danova, M., Feoktystova, O., Melnyk, R. (2019). Formation of teams of performers of projects at innovative enterprises within the framework of the “Industry 4.0” concept. *International Journal of Supply Chain Management*, 8 (4), 962–969.
5. Samdantsoodol, A., Cang, S., Yu, H., Eardley, A., Buyantsogt, A. (2017). Predicting the relationships between virtual enterprises and agility in supply chains. *Expert Systems with Applications*, 84, 58–73. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.04.037>
6. Panetto, H., Iung, B., Ivanov, D., Weichhart, G., Wang, X. (2019). Challenges for the cyber-physical manufacturing enterprises of the future. *Annual Reviews in Control*, 47, 200–213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.02.002>
7. Romero, D., Rabelo, R. J., Hincapie, M., Molina, A. (2009). Next Generation Manufacturing Systems and the Virtual Enterprise. *IFAC Proceedings Volumes*, 42 (4), 630–637. doi: <https://doi.org/10.3182/20090603-3-ru-2001.0196>
8. Sobchak, A., Shostak, E., Tseplyaeva, T., Popova, O., Firsova, A. (2016). Designing an approach to building the teams of high technological projects performers at virtual instrument-making enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (2 (81)), 47–54. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71493>
9. Sobchak, A., Shostak, E. (2016). Information technology for synthesis of integrated decision support system on the virtual instrument-making enterprise. *ScienceRise*, 3 (2 (20)), 54–58. doi: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.64502>
10. Kniazieva, T., Kolbushkin, Y., Smerichevskiy, S. (2017). Method of strategic planning and management decision-making considering the life cycle theory. *Baltic Journal of Economic Studies*, 3 (5), 175–182. doi: <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2017-3-5-175-182>
11. Ren, J., Toniolo, S. (2018). Life cycle sustainability decision-support framework for ranking of hydrogen production pathways under uncertainties: An interval multi-criteria decision making approach. *Journal of Cleaner Production*, 175, 222–236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.070>
12. Kosenko, V. (2018). Decision support system in planning investment projects. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4 (6), 113–119. doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.113>
13. Мінцер, О. П., Палагін, О. В., Величко, В. Ю., Стрижак, О. Є., Тахере, Г. (2011). Інструменти підтримки процесів аналітичної діяльності експерта при тематичному дослідженні інформаційних ресурсів і джерел. *Медична інформатика та інженерія*, 2, 12–23.
14. Собчак, А. П., Солдатенко, М. О. (2013). Применение нечёткой логики при построении искусственного интеллекта. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 3, 49–53.